

基坑降水引起地面沉降计算方法研究

许锡金 李东霞
(中航勘察设计研究院, 北京 100086)

【摘要】 论述了基坑降水引起粘性土地基沉降计算理论公式应以给水度(μ)进行修正的原因, 提出了基坑边不同距离的建筑物及其不同部位沉降计算的具体方法和相应的理论公式。

【关键词】 孔隙贯通率; 给水度; 计算点; 浸润曲线

【中图分类号】 TU 463; TU 433

Study on Calculating Method of Ground Subsidence Caused by Pit-dewatering

Xu Xijin Li Dongxia
(Avic Institute of Geotechnical Engineering, Beijing 100086 China)

【Abstract】 Discussing the reason for the formula to calculate ground subsidence is corrected by feedwater percentage (μ) in the cohesive soil for the dewatering of pit, putting forward the specific methods and theoretical formulae of the subsidence calculation for building and its different sites away from pit.

【Key Words】 holing ratio of porosity; feedwater percentage; calculating point; curve of infiltration

0 引言

在降水过程中应防止地基土流失, 确保地基不受扰动, 并应防止施工降水造成邻近建筑地基下沉或产生倾斜等不利影响。由于地基土层的岩性不同, 在降水井设计和施工过程没有针对不同含水层的岩性特征采用相应的措施, 结果导致出水含砂泥量过高, 破坏地层结构, 造成塌陷, 直接危及基坑周边地基稳定性。引起地面沉降的另一原因是水位下降使得地层孔隙中的静水压力减少, 给地基土施加一个附加应力, 导致土层压缩而引起地面沉降。为了确保基坑周边建筑物地基稳定性, 在降水设计时, 应根据降水含水层的特性、地下水位、基坑大小、降水深度、周边建筑物的远近、高度及基础深度等因素, 对周边建筑物地基的沉降量及沉降差进行评估计算, 计算结果对降水方案的可行性起决定作用。

1 降水引起地面沉降计算的理论公式

在井点降水无大量泥砂排出的情况下, 周围地面在降低水位深度内砂土含水层与粘性土弱含水层互层组合的地层沉降量可以采用分层总和法进行计算。总沉降量等于各土层沉降的总和。

1.1 粘性土及粉土层沉降计算

粘性土及粉土层沉降计算公式为:

$$s_{\infty} = \frac{a}{1 + e_0} \Delta p H \quad (1)$$

1.2 砂土沉降计算

砂土沉降计算公式为:

$$s_{\infty} = \frac{\Delta p H}{E} \quad (2)$$

式中: s_{∞} 为计算层的最终沉降量, cm; a 为粘性土或粉土的压缩系数, MPa^{-1} ; e_0 为粘性土或粉土的原始孔隙比; H 为计算土层的厚度, cm; E 为砂土的弹性模量, MPa; Δp 为水位变化施加于土层的附加应力, MPa。

理论公式中的 a 、 e_0 、 E 参数依据岩土工程勘察报告比较容易确定。其中 Δp 、 H 参数根据不同岩性及计算目的有不同的取值, 其计算结果相差较大, 本文将对它进行讨论。

2 Δp 不同取值的依据及在计算中的含意

降水水位降低施加于地基土的附加应力 (Δp) 理论上为水位降低值 (ΔH) 与水重度 (γ_w) 的乘积。即:

$$\Delta p = \Delta H \gamma_w \quad (3)$$

粘性土与砂土的 Δp 取值是不同的, 将在下面进行讨论。

因基坑大井降水所形成的漏斗状浸润(压头)曲面随着抽水过程渐趋稳定,所以基坑周边不同距离的建筑物及其不同部位的水位下降值是不同的,设计计算点的水位下降值为 $\Delta H'$,则

$$\Delta H' = H - H_r \quad (4)$$

式中: H 为潜水含水层的厚度或承压含水层的水头值; H_r 为计算点的水头值(从含水层的底板计起)。

关于 H_r 的计算方法后面将专门介绍。

2.1 砂土层中 Δp 有二种不同取值

$$\textcircled{1} \quad \Delta p = \Delta H' \gamma_w \quad (5)$$

将式(5)代入式(2)计算的沉降量是基坑周边不同计算点处的地层沉降量,不同计算点沉降量不同,可以用于计算建筑物地基的沉降差。

$$\textcircled{2} \quad \Delta p = \Delta \bar{H} \gamma_w \quad (6)$$

式中: $\Delta \bar{H}$ 为降水影响带内的平均水位降,即为基坑水面降低值(ΔH)与影响边界($\Delta H=0$)的平均值。

$$\Delta \bar{H} = \frac{1}{2} \Delta H \quad (7)$$

将式(7)代入式(6)得:

$$\Delta p = \frac{1}{2} \Delta H \gamma_w \quad (8)$$

将式(8)代入式(2)计算的沉降量为降水影响带内的平均沉降量,计算结果对评估基坑周边建筑物的地基稳定性意义不大。

2.2 粘性土中 Δp 的取值讨论

粘性土颗粒细,孔隙小,孔隙中主要存在着结合水、毛细水和重力水。粘性土的孔隙在自然状态下有的呈封闭状态,有的互相贯通,只有那些互相贯通整个土层的孔隙存在的重力水能够传递静水压力,因而在确定因水位降低而施加于土层的附加荷载时应考虑这一点,即对式(3)应以孔隙贯通率(k)加以修正^[1],即

$$\Delta p = k \Delta H' \gamma_w \quad (9)$$

粘性土的孔隙度(n)中包括重力水、结合水、贯通孔隙与封闭孔隙的体积,因而 $k < n$ 。如何求得 k 值是一难题,但从理论上分析可知,贯通率(k)与粘性土的容水度(n)、持水度(α)、给水度(μ)密切相关,对一般粘性土(膨胀性粘土除外)饱和时的容水度与孔隙度相当。持水度(α)指在重力作用下土层所能保持的水量与该土层的体积比,存在于孔隙中的结合水是不受重力作用影响的,因此,在重力作用下土层所能保持的水量实际上便是最大结合水的水量。给水度(μ)指在重力作用下能够从土层中自由流出的水量与该土层的体积比,数量等于容水度

(n)减去持水度(α),即

$$\mu = n - \alpha \quad (10)$$

通过以上分析,以 μ 代替式(9)中的 k 是可行的,即

$$\Delta p = \mu \Delta H' \gamma_w \quad (11)$$

从式(10)可知,容水度(n)虽去掉结合水体积,但仍然包括封闭孔隙的体积,因而以 μ 代替 k 对 Δp 进行修正仍偏于安全。

当给水度(μ)缺乏实测资料时,可通过式(10)计算获得,其中孔隙度(容水度) n 从岩土工程勘察报告中获取,报告中未直接提供时,可通过 e 与 n 换算公式得到。

$$n = \frac{e}{1+e} \quad (12)$$

持水度(α)可按经验取值,土层颗粒愈细其持水度愈大,颗粒直径为0.05~0.005 mm时 $\alpha=0.102$,颗粒直径 <0.005 mm时 $\alpha=0.449^{[2]}$ 。因此当计算土层为砂质粉土、粘质粉土时,建议近似取 $\alpha=0.10$;粘土建议取 $\alpha=0.45$;粉质粘土、重粉质粘土取二者中间值。

将式(11)代入式(1)得:

$$s_{\infty} = \frac{a}{1+e_0} \mu \Delta H' \gamma_w H \quad (13)$$

因 $\Delta H'$ 是计算点的水位下降值,所以计算结果为计算点的沉降值。

2.3 计算土层厚度 H 的取值

计算土层厚度 H 的确定应在认真分析场地水文地质条件和环境条件后按下列原则考虑。

①降水面以下的土层不可能产生明显的固结沉降量,因而通常仅计算降水面至静水面这段的沉降量。

②当计算场地地下水水位变化幅度较大时,其水位年变化带内的厚度可以不纳入计算厚度内,因常年反复变化已促使该段土层的压缩变形基本趋于稳定。

③基坑周边建筑物基础以上土层的厚度可不予考虑,因计算沉降的目的是为评估建筑物地基的稳定性,该段的沉降不会危及建筑物地基的稳定性。

3 计算点水位下降值 $\Delta H'$ 的计算方法

基坑大井降水形成稳定的漏斗状浸润(压头)曲面,基坑周边不同距离的建筑物及其不同部位的水位下降值 $\Delta H'$ 是不同的。为了评估建筑物地基的沉降量和沉降差,必须对不同计算点的水位下降值 $\Delta H'$ 进行计算。

3.1 用潜水完整井浸润曲线方程式确定计算点的水位下降值 $\Delta H'$

根据公式(4) $\Delta H' = H - H_r$, H_r 可利用潜水完整井浸润曲线方程式进行计算(见图1)。

$$\text{由 } H_r^2 - h_w^2 = \frac{Q}{\pi K} \ln \frac{r+r_0}{r_0} \quad (14)$$

$$\text{则 } H_r = \sqrt{h_w^2 + \frac{Q}{\pi K} \ln \frac{r+r_0}{r_0}} \quad (15)$$

$$\text{因为 } Q = \frac{\pi K (2H - S) S}{\ln \frac{R+r_0}{r_0}} \quad (16)$$

$$\text{所以 } H_r = \sqrt{h_w^2 + \frac{(2H - S) S}{\ln \frac{R+r_0}{r_0}} \ln \frac{r+r_0}{r_0}} \quad (17)$$

式中: $\Delta H'$ 为计算点的水位下降值; H_r 为距基坑边 r 处计算点的水头值(从含水层底板计起); H 为潜

水含水层的厚度; h_w 为满足基坑降水的井点稳定水头值(从含水层底板计起); S 为基坑水位降深值 ($S = H - h_w$); r_0 为基坑仿大井半径; r 为基坑边至计算点的距离; R 为基坑降水影响半径; K 为含水层渗透系数。

3.2 地下水向承压一无压井流动时确定计算点水位下降值 $\Delta H'$

当基坑底穿透承压含水层顶板时, 将承压水头降至基坑底部以下而引起地下水流动由承压变为无压形态(见图2), 对基坑大井测定涌水量时可考虑在“ a ”区域范围内是地下水无压流动, 而该范围外为承压水流动, 故可以根据分段法将水流看成有以 a 为半径的虚构大井, 其影响半径为 $(r_0 + R)$, 另外在大井内设想存在另一个以“ r_0 ”为半径的基坑大井, 其影响半径为 $a^{[3]}$ 。二者流量表示式可写成:

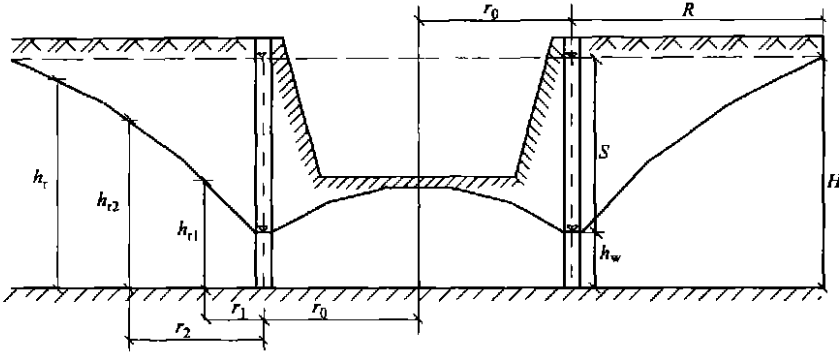


图1 潜水基坑完整大井计算剖面图

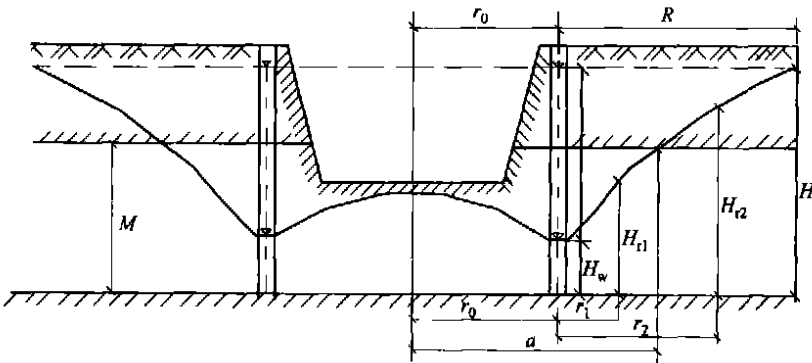


图2 无压—承压基坑完整大井计算剖面图

$$Q = \frac{2\pi K M (H - M)}{\ln \frac{R+r_0}{a}} \quad (18)$$

$$Q = \frac{\pi K (M^2 - h_w^2)}{\ln \frac{a}{r_0}} \quad (19)$$

$$Q = \frac{\pi K (2HM - M^2 - h_w^2)}{\ln \frac{R+r_0}{r_0}} \quad (20)$$

无压地段的浸润曲线方程式为:

$$H_{r1} = \sqrt{h_w^2 + \frac{Q}{\pi K} \ln \frac{r_0+r_1}{r_0}} \quad (21)$$

二式中消去 a 即得该类基坑仿大井的涌水量计算公式:

承压地段的水头方程为:

$$H_{r2} = M + \frac{Q}{2\pi KM} \ln \frac{r_0 + r_2}{a} \quad (22)$$

式中: M 为承压含水层的厚度; H 为承压含水层的水头值(从含水层底板计起), r_1 为无压段计算点至基坑井点的距离; r_2 为有压段计算点至基坑井点的距离; a 为由基坑大井中心至无压运动变为有压运动断面的距离, 其它符号同前。

a 值可由式(19)移项求得:

$$\ln a = \ln r_0 + \frac{\pi K (M^2 - h_w^2)}{Q} \quad (23)$$

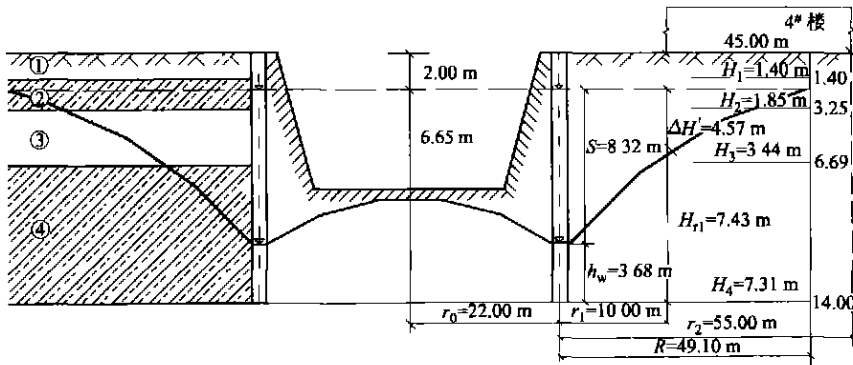


图3 4#楼地基沉降计算示意剖面图

4.1 计算4#楼距基坑最近处($r_1 = 10$ m)的地基沉降量 $s_{\infty 10}$

依式(17)

$$H_{r10} = \sqrt{h_w^2 + \frac{(2H - S)S}{\ln \frac{R + r_0}{r_0}} \ln \frac{r + r_0}{r_0}} = 7.43, \text{ m}$$

依式(4) $\Delta H' = H - H_{r10} =$

$$12.00 - 7.43 = 4.57, \text{ m}$$

计算沉降段总厚度为4.57 m, 其中粘质粉土②层 $H_1 = 1.25$ m, $a = 0.2$ MPa⁻¹, $e = 0.62$, $n = 0.38$ 。粉砂③层 $H_2 = 3.32$ m, $E = 85$ MPa, 按分层总合法分别计算沉降量。

$$\textcircled{1} \text{粘质粉土层沉降量 } s_1 = \frac{a}{1 + e_0} \Delta p H_1$$

依式(10) $\mu = n - \alpha = 0.28$

$$\text{依式(11) } \Delta p = \mu \Delta H' \gamma_w = 0.0128, \text{ MPa}$$

$$\text{则 } s_1 = \frac{0.2}{1 + 0.62} \times 0.0128 \times 125 = 0.197, \text{ cm}$$

$$\textcircled{2} \text{粉砂层的沉降量 } s_2 = \frac{\Delta p H_2}{E}$$

依式(5) $\Delta p = \Delta H' \gamma_w = 0.0457, \text{ MPa}$

$$\text{则 } s_2 = \frac{0.0457 \times 332}{85.0} = 0.178, \text{ cm}$$

4 降水沉降计算实例

以北京大学医学部研究生公寓基坑降水时对4#楼地基沉降评估计算为例。基坑降水对周边建筑物地基沉降计算是在基坑降水设计计算基础上进行的, 计算依据参数如下: $r_0 = 22.0$ m, $R = 49.1$ m, $H = 12.0$ m, $h_w = 3.68$ m, $S = 8.32$ m。潜水静止水位埋深为2.0 m, 4#楼距基坑最近处 $r_1 = 10$ m, 最远处 $r_2 = 55$ m, 地层岩性等见4#楼地基沉降计算示意剖面图(图3)。

$$s_{\infty 10} = s_1 + s_2 = 0.375, \text{ cm}$$

4.2 计算4#楼距基坑最远处($r_2 = 55$ m)的地基沉降量 $s_{\infty 55}$

按上述同样方法计算 $H_{r55} = 12.36 > H$ (12.0 m), 说明该处已超出降水影响半径 $R = 49.1$ m, 即没有发生水位下降 ($\Delta H' = 0$) 所以 $s_{r55} = 0$

4.3 评估结论

4#楼距基坑最近点与最远点的沉降差为0.375 cm, 二点距离45 m, 倾斜率为 8.3×10^{-5} , 差异沉降引起建筑物倾斜在《建筑地基基础设计规范》(GB50007-2002)的允许值之内。因此采用管井围降方案不会危及4#楼地基稳定。

施工结果表明, 经过三个多月连续抽降, 对4#楼地基没有发生任何不良影响。

5 结论

1) 基坑降水引起地基沉降的主要原因是水位降低使得地基土孔隙中的静水压力减少而施加于地基土的附加应力所致。静水压力在粘性土与砂土孔隙中的传递机理有所不同, 粘性土孔隙中静水压力只能在贯通整个土层的孔隙中传递, 因而在计算粘性土附加应力 Δp 时应以贯通率(k)加以修正, 通过本文论证和分析, 其贯通率(k)与粘性土层的给水度

(μ)相当,因 μ 值较 k 值容易获得,所以在实际计算时采用 μ 值对粘性土 Δp 进行修正更具实用性。

2) 基坑降水引起地基沉降只在降水影响带内发生。以往仅计算影响带内地基土的平均沉降量,这对降水工程的实际意义不大。沉降计算的目的是评估基坑周边已有建筑物地基的稳定性,基坑周边不同距离的建筑物及其不同部位的水位下降值是不同的(即沉降量不同),文内提出处于降水影响带内不同计算点水位下降值的计算公式,根据降水方案 and 不同水文地质条件选择相应公式就可方便地计算出不同计算点的水位下降值,然后代入相应的沉降理

论公式可以计算出建筑物不同部位的沉降量及倾斜率,可较精确地评估基坑周边建筑物地基的稳定性。

参 考 文 献

- 1 黄志伦. 关于地下建筑物的地下水扬力问题分析. 岩土工程技术, 2002(5): 273~274
- 2 北京地质学院水文地质及工程地质教研室. 普通水文地质学. 北京: 地质出版社, 1960. 85~86
- 3 北京地质学院水文地质教研室. 地下水动力学. 北京: 中国工业出版社, 1961. 85~86

收稿日期 2004-04-20

(上接第 193 页)

3.3 复合地基承载力修正

由于竖向增强体的介入,复合地基承载力较天然地基有所提高,复合土体的抗剪强度亦有所提高。一般情况下,竖向增强体多设置在基础范围之内,这使得主动区内的土体为复合土体而被动区内的土体为天然土体,两者在抗剪强度准则上存在差异。由于复合土体的抗剪强度准则较难确定,尚待研究,这使得复合地基承载力的修正问题目前还没能得到真正意义上的解决。

通常复合地基承载力修正计算存在两种思路^[6]:一种思路是先对天然地基进行修正,然后再与竖向增强体复合,不考虑基础深宽对竖向增强体的影响;另一种思路同文献[7]中的规定,即先复合再修正,修正公式与天然地基相同,只是深度修正系数取 1,宽度修正系数取 0。在实际计算中两者的差异是显而易见的^[8]。大量实践与相关研究表明:思路二由于考虑基础深宽对竖向增强体的影响,并将研究对象视为复合土体,较为接近复合地基的实际作用情况。

4 结 论

1) 地基土承载力不单是地基土自身重度 γ 与抗剪强度指标 c, φ 值的函数,同时还与作用其上的基础埋深 d 与基础宽度 b 等因素密切相关。确定地基承载力时应立足于地基土的自身强度参数,考虑各种

制约因素,并参考相应的载荷试验资料结合地区经验综合确定。

2) 地基基础设计时,应根据实际的基础埋深(或旁载)与宽度对勘察资料中的地基土承载力进行修正。

3) 复合地基承载力修正问题还有待进一步研究。实践表明先复合再修正的设计思路由于考虑基础深宽对竖向增强体的影响,并将研究对象视为复合土体,较为接近复合地基的实际作用情况。

参 考 文 献

- 1 陈希哲. 土力学地基基础(第三版). 北京: 清华大学出版社, 1998. 148~165
- 2 顾晓鲁等. 地基与基础(第二版). 北京: 中国建筑工业出版社, 1993. 91~105
- 3 方晓阳等. 基础工程手册. 北京: 中国建筑工业出版社, 1986
- 4 DBJ 01-501-92 北京地区建筑地基基础勘察设计规范
- 5 GB5007-2002 建筑地基基础设计规范
- 6 龚晓南. 复合地基. 杭州: 浙江大学出版社, 1992. 78~79
- 7 JGJ79-2002 建筑地基处理技术规范
- 8 程学军等. 刚性桩复合地基设计中关于承载力的几个问题. 岩土工程技术, 2002(4): 198~200

收稿日期 2004-06-16